Le sablier amnésique

force - poids - poussée d'Archimède - moment d'une force - frottement

En utilisant un sablier lesté et une éprouvette remplie d'eau, on montre quel est l'effet sur le mouvement d'un solide de forces qui ne passent pas par le centre d'inertie.

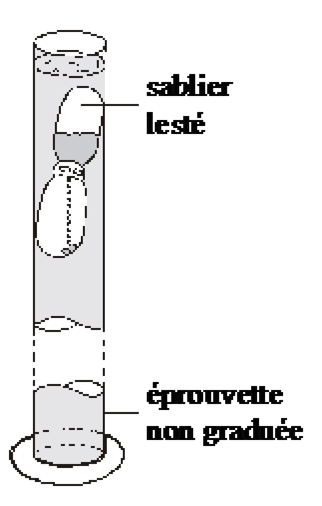
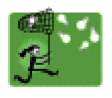


Figure 1



Matériel

- un sablier (démonter un sablier de cuisine du commerce et récupérer la partie en verre) ;
- de la pâte à modeler ;
- un cordon pour lester les rideaux contenant des billes de plomb (longueur approximative : 5 cm) ; on peut se procurer ce cordon en mercerie ou bien acheter au rayon loisirs des billes de plomb utilisées en modélisme pour lester les bateaux ;
- une cuvette d'eau ;
- une éprouvette non graduée transparente remplie d'eau (diamètre intérieur supérieur d'au moins 7 mm à celui du sablier) ;
- un bouchon de caoutchouc pour boucher l'éprouvette ;
- accessoires : ciseaux, marteau, tenailles.



Montage et réalisation

Il faut lester le sablier pour qu'il puisse s'enfoncer dans l'eau. L'expérience ne peut réussir que si le poids du sablier est légèrement supérieur à la poussée d'Archimède. C'est la raison pour laquelle nous vous conseillons de respecter le mode d'emploi suivant.

Faire un cordon mince en pâte à modeler, l'enrouler autour de la partie centrale étroite du sablier et appuyer fortement.

Enlever le tissu qui entoure le ruban de lestage des rideaux et détacher une à une les billes de plomb. Enfoncer dans la pâte à modeler suffisamment de billes de plomb pour faire descendre le sablier jusqu'au

fond de la cuvette remplie d'eau. Oter alors la dernière bille de plomb introduite dans la pâte à modeler, l'aplatir avec le marteau, la couper en huit morceaux à l'aide des tenailles. Enfoncer un à un les petits morceaux de plomb dans la pâte à modeler jusqu'à ce que le sablier s'enfonce dans la cuvette jusqu'au fond. Ce procédé permet de limiter à moins d'un huitième du poids d'une bille de plomb la différence entre le poids du sablier et la poussée d'Archimède qu'il subit dans l'eau.

On peut remplacer le ruban de lestage des rideaux par les petites billes de plomb qui servent à lester les modèles réduits de bateaux. Le mode opératoire est le même qu'avec les billes de plomb pour les rideaux. Ces petites billes pour modélisme présentent cependant l'avantage d'être suffisamment petites pour qu'on n'ait pas besoin de les couper en huit. Leur inconvénient est leur prix plus élevé.

Laisser s'écouler complètement le sable et introduire le sablier dans l'éprouvette de telle sorte que la partie qui contient le sable soit située en haut. Le sablier ne s'enfonce pas immédiatement dans l'éprouvette : il semble avoir « oublié » pendant quelques secondes qu'il est plus lourd que l'eau déplacée.

On peut reproduire l'expérience autant de fois qu'on le souhaite. Il suffit d'attendre que tout le sable se soit écoulé dans le sablier, de boucher l'éprouvette avec un bouchon de caoutchouc et de la retourner.



Explications

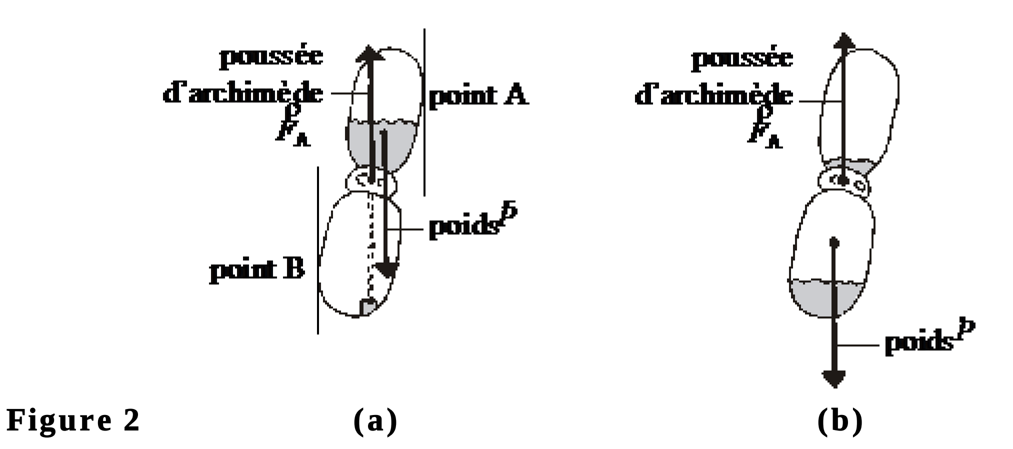


Figure 2 **(a)** **(b)**

Les forces qui s'exercent sur le sablier immergé sont son poids $\vec{P}$ et la poussée d'Archimède $\vec{F}_A$. Le poids s'exerce au centre de gravité du sablier (figure 2), celui-ci est situé dans la partie du sablier qui contient le plus de sable. La poussée d'Archimède s'exerce au centre de gravité de l'eau déplacée par le sablier immergé, c'est-à-dire au centre du sablier (centre de la partie étroite, voir figure 2).

Le sablier est donc soumis à la force résultante $\vec{F}_T = \vec{P} + \vec{F}_A$.

Le moment $\vec{M}$ du couple a pour valeur $M = F_A.d$ (F_A : valeur de la force $\vec{F}_A$; d : distance entre les droites d'action des forces $\vec{F}_A$ et $\vec{P}$) car on peut considérer que $F_A = P$.

Le sablier a été lesté de façon à tout juste s'enfoncer dans l'eau. La poussée d'Archimède est légèrement plus faible que le poids. La résultante $\vec{F}_T$ des forces $\vec{F}_A$ et $\vec{P}$ est donc dirigée vers le bas.

Dans cette expérience on introduit le sablier dans l'éprouvette de telle sorte que la plus grande partie du

sable se trouve dans la moitié supérieure (figure 2a). Le moment $\vec{M}$ fait pivoter le sablier qui touche donc la paroi de l'éprouvette aux points A et B. La composante normale de la force pressante exercée par le sablier sur la paroi est $\vec{F}_P$. Sa valeur F_P est proportionnelle au moment M. Il n'y a pas de glissement si :

$$F_T < 2.m_S.F_P \qquad (1)$$

(m_S : coefficient de frottement statique entre la paroi du sablier et celle de l'éprouvette).

Le coefficient 2 dans l'équation (1) tient compte du fait que le contact entre le sablier et l'éprouvette a lieu en deux points A et B. Au fur et à mesure que le sable s'écoule dans le sablier, le centre de gravité du sablier se déplace vers le centre géométrique du sablier, ce qui entraîne une diminution de d. Il en résulte une diminution de M et corrélativement une diminution de F_P. Le sablier se met à glisser lorsque :

$$F_T > 2.m_S.F_P$$

Si l'on néglige la résistance due au frottement de l'eau sur le sablier qui se déplace, la force résultante exercée sur le sablier a alors pour valeur $F_T - 2.m_D.F_P$ et elle est dirigée vers le bas (m_D : coefficient de frottement dynamique entre les surfaces du sablier et de l'éprouvette).

Lorsque le centre de gravité du sablier traverse le centre géométrique du sablier, le moment $\vec{M}$ du couple change de sens et il a pour effet de redresser le sablier à la verticale (figure 2b). Le contact entre la paroi de l'éprouvette et le sablier cesse. La force résultante s'exerçant sur le sablier se ramène alors à $\vec{F}_T$.



Références bibliographiques

Gardner, M. : Physik und Didaktik 14/2 (1986) 160

Walker, J. : Le carnaval de la physique, Dunod, Paris, 1997